

# 复杂目标双站 RCS 的图形电磁计算

杨正龙<sup>1</sup>, 金 林<sup>1</sup>, 倪晋麟<sup>1</sup>, 方大纲<sup>2</sup>

(1. 南京电子技术研究所预研部, 江苏南京 210013; 2. 南京理工大学毫米波技术研究室, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 本文通过物理光学和增量长度绕射系数, 将图形电磁计算方法扩展到复杂目标双站 RCS 的计算领域, 并计算了一些标准体和实际复杂目标的双站 RCS, 计算结果准确可信, 并且 GRECO 方法具有很高的计算效率, 这对于雷达组网、隐身和反隐身等方面的研究具有很好的工程应用价值。

**关键词:** 电磁散射; 双站 RCS; 物理光学; 增量长度绕射系数

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-1033-03

## Bistatic RCS Calculation of Complex Target by GRECO

YANG Zheng-long<sup>1</sup>, JIN Lin<sup>1</sup>, NI Jing-ling<sup>1</sup>, FANG Da-gang<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China;

2. Millimeter Wave Lab. of Nanjing University of Sci. and Tech, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Graphical Electromagnetic Computing (GRECO) is extended to bistatic Radar Cross Section (RCS) calculation of Complex Target in high frequency band by Physical Optics (PO) and Incremental Length Diffraction Coefficients (ILDC). Some standard targets' bistatic RCS obtained by the approach coincide with those obtained by different approaches. This approach is applicable for the research works of radar networking and stealth or anti-stealth technology.

**Key words:** EM scattering; bistatic RCS; physical optics; incremental length diffraction coefficients

### 1 引言

图形电磁计算方法 GRECO 是一种计算电大尺寸复杂目标 RCS 的有效方法<sup>[4]</sup>, 它充分利用了计算机显示硬件的图形加速功能, 通过不同的光照模式, 巧妙地获得目标表面上每一像素点处的法向量, 并且利用计算机图形加速卡的深度缓存 (Z-Buffer) 来获得目标表面上每一像素点处的深度信息, 准确地计算出散射元之间的相位关系, 结合复杂目标在高频区的物理光学近似 (PO) 和物理绕射理论 (PTD), 可以准确地获得目标表面上每一像素点处的散射场及绕射场, 目标的总散射场则可以由这些离散点处的散射场相干叠加而获得。

但是 GRECO 方法主要用于计算目标的单站 RCS, 在雷达组网、隐身和反隐身的研究中, 经常需要计算目标的双站 RCS, 文献[3]利用单-双站等效原理, 结合图形电磁计算方法进行了双站 RCS 计算的研究, 但是单-双站等效原理仅仅在双站角远小于  $\pi$  的情况下是基本正确的, 当双站角接近  $\pi$  时, 该理论明显是错误的。本文则从 GRECO 的计算原理出发, 利用多边形面元的双站散射计算, 对原有的 GRECO 软件进行功能扩展, 可以快速计算目标在任意极化方式, 较大双站角下的 RCS (双站角小于  $120^\circ$ ), 这种情况满足一般的工程应用需要, 对于实际的复杂目标, 当双站角接近  $180^\circ$  时, 计算结果会

出现较大误差。本文计算了一些标准体及复杂目标的双站 RCS, 计算结果与其他方法所获得的结果是一致的, 并且图形电磁计算方法具有很高的计算效率, 具有实际的工程实用价值。

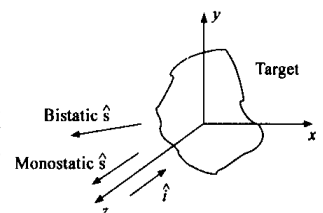


图1 GRECO 计算模型

### 2 GRECO 简介

GRECO 的计算模型如

图 1 所示的单站情况, 坐标系统以目标中心为原点, 在远场单站情况下, 发射机和接收机位于  $+z$  轴无穷远处。入射波的方向为  $\hat{s} = \{0, 0, -1\}$ , 散射波的方向为  $\hat{s} = \{0, 0, 1\}$ 。其计算步骤如下:

- (1) 读取目标三维模型文件, 并进行图形渲染。
- (2) 利用深度缓存获得表面上各点的深度信息, 并正确地映射到目标深度。
- (3) 利用不同的光照获得目标上各点的法矢。
- (4) 对于每个像素所对应的平板面元, 利用 PO 计算其散射场, 对于棱边, 通过 PTD 计算其绕射场。
- (5) 将各点的散射场相干叠加获得总散射场。

当前计算机和图形显示技术可以方便地在 PC 上实现以上功能. 三维模型文件可以由许多造型软件来生成, 如 AutoCAD, 3D MAX 等, 这些成熟的软件可以利用不同的曲面造型方法对目标的几何形状进行精细的描述. 计算机的图形渲染主要基于通用的 OpenGL 图形规范. 在目标 RCS 的计算过程中, 三维模型的旋转, 平移, 缩放都是由图形加速芯片来完成, CPU 只承担了法矢计算、深度映射计算以及散射场的计算, 这使得 GRECO 具有实时的计算能力. 在 [4, 5] 中, JuanM Rius 和刘铁军教授对 GRECO 方法做了详细的描述, 在此不再赘述.

### 3 多边形面元的双站散射

平板面元模型属于 RCS 计算中的高频方法, 是在 Stratton-Chu 积分方程的基础上, 通过物理光学近似推导出来的, 在 [1] 中, E F Knott 在保留散射单元相对相位关系的情况下重新定义了复数 RCS 的表达式:

$$\sqrt{r} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2 \sqrt{R} \frac{E_s \cdot \hat{e}_r}{E_0} e^{ikR}$$

其物理光学表达式为:

$$\sqrt{r} = -i \frac{k}{\sqrt{T}} \int_S \hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i e^{ikr \cdot (\hat{r} - \hat{s})} dS \quad (1)$$

对于平板结构, 此积分可以严格计算, 在文献 [2] 中, Gordon 将式 (1) 中的面积分变换为对于多边形的围线积分:

$$\sqrt{r} = -\frac{\hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i}{\sqrt{T}} \sum_{m=1}^M e^{ikr_0 \cdot w} (\hat{p} \cdot \hat{a}_m) e^{ikr_m \cdot w} \frac{\sin(\frac{1}{2} ka_m \cdot w)}{\frac{1}{2} ka_m \cdot w} \quad (2)$$

式中:  $\sqrt{r}$  为平板的双站 RCS,  $\hat{n}$  为平板的单位法矢,  $\hat{e}_r$  为远场接收机电极化方向的单位矢量,  $r_0$  为源点的位置矢量,  $w = \hat{r} - \hat{s}$ ,  $\hat{r}$  为入射波方向的单位矢量,  $\hat{s}$  为散射波方向的单位矢量,  $\hat{a}_m$  为描述第  $m$  个边缘的长度和方向的矢量, 这些边缘从头到尾沿周界分布,  $r_m$  为第  $m$  个边缘中点的位置矢量,  $T$  为  $w$  在平面上的投影长度,  $\hat{p} = \hat{n} \times w / |\hat{n} \times w|$ , 即垂直于  $w$  的平板平面上的单位矢量,  $M$  为平板边缘数目.

注意到 (2) 在  $T=0$ , 即  $\hat{r}$  平行于  $\hat{s}$  时出现奇异性, 此时平板平面上没有  $(\hat{r} - \hat{s})$  的分量, 因此, 这个表面与从源点到远场观察点逐渐延迟的等相位面重合, 表面上没有相位的变化, 公式 (2) 变为:

$$\sqrt{r} = -\frac{ikA}{\sqrt{T}} \hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i e^{ikr_0 \cdot w} \quad (3)$$

$A$  为平板的面积. 对于单站散射, 公式 (3) 即:

$$= 4 A^2 / \quad (4)$$

任何复杂目标在经过计算机图形渲染后, 其照亮部分都是以像素为单元显示在计算机屏幕上, 每一个像素对应于实际目标表面上的一个小的平行四边形, 此平行四边形在计算机屏幕 ( $xoy$  平面) 上的投影为一像素单元, 像素对应的实际长度  $l$  和宽度  $w$  可以通过简单的尺度变换得到, 像素点处的法向矢量  $\hat{n}$  对应于此平行四边形的法矢. 注意到计算机显示屏幕上的像素为一个各边平行于  $x$  或  $y$  轴的小正方形, 正方形的边对应于空间的向量为

$$\begin{aligned} a_1 &= \{0, -l, 0\}, & a_2 &= \{w, 0, 0\} \\ a_3 &= -a_1, & a_4 &= -a_2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\hat{a}_m$  表示投影, 小正方形对应的四边形四条边在空间的矢量可由下式得到:

$$a_m = a_m - (\hat{n} \cdot a_m) a_m, \quad m=1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

这样, 目标表面上被入射波照射的四边形就可以由屏幕上的像素信息得到, 从而代入公式 (2) 求解出每一个四边形的双站散射, 最后将所有被照射的四边形散射相干叠加得到目标总的双站散射.

### 4 棱边的双站散射计算

当入射场垂直于入射面时, 单站情况下, 可利用 PID 绕射系数来快速计算棱边的单站散射. 但是 PID 依赖于二维尖劈问题的严格解, 只能用于 Keller 锥的散射方向, Mitzner 的增量长度绕射系数将 Ufimtsev 的物理绕射理论 PID 推广到了任意散射方向 [1], 适合棱边双站散射的计算. 边缘上一个微分单元产生的远区散射场可以通过并矢绕射系数  $\bar{d}$  表示为:

$$E_d = E_i \frac{e^{i(kR - \pi/4)}}{\sqrt{2} R} \bar{d} \cdot \hat{p} dt \quad (7)$$

式中  $dt$  表示边缘上的微元,  $\hat{p}$  表示沿入射电极化方向的单位矢量, 且:

$$\bar{d} \cdot \hat{p} = d \hat{e}^s \cos \theta + d \hat{e}^s \sin \theta + d \hat{e}^s \cos \theta + d \hat{e}^s \sin \theta \quad (8)$$

式中  $\theta$  为入射极化和入射平面法线之间的张角,  $\bar{d}$  的各个分量计算公式在文献 [1] 中给出, 本文不再赘述.

$$\hat{e}^s = \hat{r} \times \hat{s} / |\hat{r} \times \hat{s}|, \quad \hat{e}^s = \hat{s} \times \hat{e}^s$$

其中  $\hat{r}$  为边缘方向的单位矢量.

GRECO 通过对像素信息的分析, 得到边缘的各个参数 [8], 将边缘参数代入公式 (8), 从而获得边缘散射场的双站结果.

### 5 计算实例

对 GRECO 进行上述扩展后, 只要确定了接收站和发射站的位置关系以及极化方式, 就可以计算复杂目标的双站 RCS. 为了检验计算的结果, 计算了一些标准体的远场双站 RCS, 设定计算模型如图 1 所示的双站情况, 发射和接收天线位于离目标无限远的地方.

#### 5.1 金属球体的计算检验

Roke Manor Research Ltd. 在因特网上公布了半径 1 米的金属球体在上述计算模型下的双站结果, 此结果是利用其开发的 Epsilon<sup>TM</sup> 软件计算的, 极化方式为水平极化, 结果如图 2 中实线所示.

利用 GRECO 对上述金属球体进行了双站 RCS 的计算, 结果如图 2 中虚线所示, 与 Epsilon 软件的结果非常吻合.

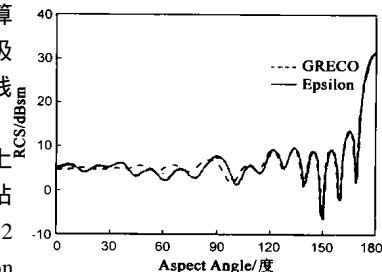


图 2 球体的双站 RCS

当双站角为 0 时(单站散射),球体的 RCS 约为 5dBsm,理论值为  $10\lg r^2 = 4.97\text{dBsm}$ ,计算值和理论值差别很小.

### 5.2 正方形平板的计算检验

设定金属平板的边长 1 米,入射波方向与平板的法向矢量的夹角为  $30^\circ$ ,频率为 1GHz.图 3 为计算结果.

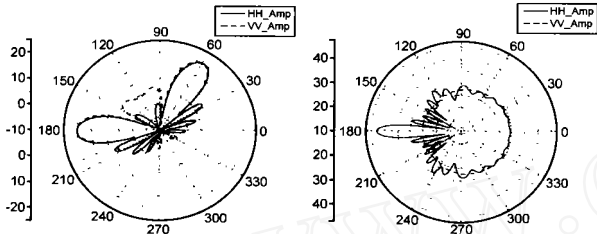


图 3 正方形平板的双站 RCS 图 4 金属圆柱的双站 RCS

对于平板来说,其双站散射有两个突出的波瓣,一个在沿着入射波的方向,另一个出现在镜面反射方向,即  $60^\circ$  方向,并且两个波瓣振幅相等,理论值为  $10\lg 4 A^2 / \lambda^2 = 21.5\text{dBsm}$ ,与文献[1]中的结果是相吻合的.

### 5.3 金属圆柱的计算检验

设定金属圆柱半径 1 米,长度为 6 米,入射波方向垂直于圆柱轴线方向,频率为 1GHz,图 4 为计算结果.与文献[1]中的结果是一致的.

### 5.4 某飞行器的计算检验

我们利用矩量法(MOM)和本文介绍的 GRECO 分别计算了某小型飞行器的双站 RCS.计算示意图如图 5,设双站角为  $30^\circ$ , $S_1$  为发射站, $S_2$  为接收站,飞行器与发射站和接收站之间的距离满足远场条件,设目标的俯仰角为  $0^\circ$ ,横滚角为  $0^\circ$ ,方位角为  $\phi = 0^\circ \sim 180^\circ$ ,计算频率为 500MHz,计算结果如图 6 所示,矩量法与 GRECO 的结果是一致的.

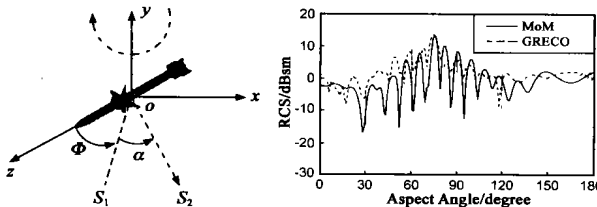


图 5 飞行器双站 RCS 求解示意图 图 6 MOM 与 GRECO 的计算结果

在一台 CPU 主频为 1.7GHz 的个人计算机上,MOM 获得上述结果需要约 2 小时,而 GRECO 仅仅需要约 2 分钟.由此可见,GRECO 是一种非常高效的散射计算方法.由图 6 可看出,MOM 的计算结果总体上比 GRECO 的结果稍微大一些,这是由于 GRECO 方法只考虑了照明区域的电流贡献,忽略了阴影区电流的贡献,导致了 GRECO 在计算目标的双站 RCS 时,当双站角增大时,计算结果的误差有所增大.虽然阴影区的电流非常小,但是在某些应用中它们对于散射的贡献是不可忽略的,在这种情况下,必须采取其它的方法进行高频散射计

算,例如采用电流步进法(Current Marching Technique)<sup>[6]</sup>、抛物线方程法(Parabolic Equation Method)<sup>[7]</sup>等.

## 6 结论

本文通过物理光学 PO 和增量长度绕射系数 LDC,结合图形电磁计算方法,将图形电磁计算软件扩展到双站 RCS 的计算领域,通过与理论值和数值方法的比较,计算结果是准确的,计算方法是高效的,对于雷达组网,隐身和反隐身等方面的研究具有很好的工程实用价值.

### 参考文献:

- [1] E F 克拉特,等.雷达散射截面——预估、测量和缩减[M].阮颖铮,等译,北京:电子工业出版社,1987.
- [2] William B Gordon. Far-field approximation to the kirchhoff-helmholtz representations of scattered field[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagat, 1975, 23(5): 590 - 592.
- [3] QIN De-hua, WANG Bao-fa. Bistatic RCS prediction with graphical electromagnetic computing (GRECO) method for moving targets[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2002, 15(3): 161 - 165.
- [4] Juan M Rius, Miguel Ferrando, Luis Jofre. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1993, 41(9): 1308 - 1318.
- [5] Liu Tiejun, Zhou Yong. Geometrical modeling and graphical RCS computing simulation for complex objects[J]. Journal of Electronics, 1997, 6(4): 35 - 39.
- [6] Andrew A Zaporozhets, Mireille F Levy. Current marching technique for electromagnetic scattering computations[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1999, 47(6): 1016 - 1024.
- [7] Andrew A Zaporozhets, Mireille F Levy. Bistatic rsc calculations with the vector parabolic equation method[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1999, 47(11): 1688 - 1696.
- [8] 杨正龙,方大纲,刘铁军.复杂目标电磁散射计算软件的改进[J].系统工程与电子技术,2002,24(4): 86 - 89.

### 作者简介:



杨正龙 男,1976 年 10 月出生于甘肃省临洮县,博士,2002 年 6 月毕业于南京理工大学,现于南京电子技术研究所博士后工作站工作,在国内杂志以及国际会议上发表论文数篇,参与了国防科工委、国家自然科学基金等多个项目的研究工作,主要研究方向为雷达成像、电磁散射计算等.

金林 男,1965 年 10 月出生于江西省永修,研究员,博士,1989 年 2 月研究生毕业于北京航空航天大学电子工程系,目前从事雷达微波天线的研究工作,作为主要参加者研制成功的《机载预警超低副瓣波导裂缝天线》1994 年获电子部科技进步特等奖、1995 年获国家科技进步二等奖,发表论文十余篇.